APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NO MAPEAMENTO DE DESLIZAMENTOS RASOS NA SUB-BACIA DO RIO COMPRIDO - JOINVILLE/SC

Natália Magalhães Demartino - nataliadmrtn@gmail.com
Universidade Federal de Santa Catarina – ENS/UFSC

Prof. Dr. Fábio Farias Pereira - fabio.farias@ufsc.br (orientador)
Universidade Federal de Santa Catarina – ENS/UFSC

Eng. Gabriel Phelipe Nascimento Rosolem - gabrielrosolem@gmail.com (co-orientador)
Universidade Federal de Santa Catarina – ECV/UFSC

Resumo: Tendo em vista o objetivo de construir ferramentas que favoreçam a gestão local dos riscos no âmbito municipal através do mapeamento de perigos, os métodos de previsão auxiliam na identificação de áreas mais susceptíveis à ocorrência de deslizamentos rasos, permitindo que ações mitigadoras e preventivas sejam implementadas. Neste trabalho é aplicado um algoritmo modificado do modelo SHALSTAB, em ambiente SIG, que utiliza dados pedológicos, topográficos e hidrológicos para determinar a razão entre a quantidade de chuva e a transmissividade do solo necessária para desencadear um deslizamento. Para tanto, foram determinadas as áreas instáveis da Sub-bacia do Rio Comprido, no município de Joinville/SC, considerando a variação espacial dos parâmetros geotécnicos dos solos e diferentes cenários de profundidade de ruptura. Os procedimentos necessários incluíram a aquisição de dados existentes, a obtenção de mapas derivados e a aplicação do modelo SHALSTAB. Os resultados obtidos apontam instabilidades maiores nas regiões de relevo ondulado a montanhoso e nos solos de substrato gnaisse, com destaque para o Neossolo litólico (RLd4) e sua baixa coesão.

Palavras-chave: deslizamentos rasos, SHALSTAB, Joinville.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O planejamento associa-se também a impactos negativos quando, em situações de excesso de chuvas, deriva enchentes, deslizamentos e desastres provocados pela alteração no escoamento natural das águas pluviais (TUNDISI, 2003). Sendo assim, na esfera federal brasileira foi instituída a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC - Lei Federal 12.608, de 10 de abril de 2012), que ressalta a identificação e o mapeamento de zonas de risco de deslizamento a fim de fornecer subsídios à tomada de decisão e na adoção de medidas preventivas e mitigadoras que venham a reduzir os impactos negativos ocasionados por um desastre nos municípios brasileiros.

Nos últimos anos, o aumento significativo dos eventos de deslizamentos nas encostas urbanas teve como principal fator determinante a ocupação desordenada do território em áreas com alta suscetibilidade. Atrelado a isto se verifica um aumento na frequência e na intensidade de eventos de chuva devido a mudanças climáticas (CORDERO *et al.*, 2009).

No Brasil, de modo geral, pode-se afirmar que a ocorrência dos deslizamentos está quase sempre associada a eventos pluviométricos extremos. Os estados brasileiros mais afetados são: Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Paraíba (KOBIYAMA *et al.*, 2006). Estes desastres podem ser devastadores para a população que ocupa áreas com riscos de enchentes ou de deslizamentos, como os eventos ocorridos em novembro de 2008 em Santa Catarina, que

também afligiu o município de Joinville. O município de Joinville localiza-se no litoral norte do Estado de Santa Catarina com peculiaridades: está próximos à Serra do Mar e às planícies costeiras e possui alto índice pluviométrico, atípico na região.

Principalmente, devido ao aumento dos perigos e da vulnerabilidade e ao surgimento de novos riscos, tornou-se inevitável o aumento nos esforços para reduzi-los. Estudos recentes têm mostrado que as melhores abordagens para a previsão espacial de instabilidade das encostas envolvem a aplicação de modelos determinísticos de estabilidade de encostas, combinado com modelos hidrológicos de estado uniforme, como o SHALSTAB (MONTGOMERY E DIETRICH, 1994), que podem fornecer cenários de instabilidade potencial sob diversas condições ambientais e climáticas.

Deste modo, este trabalho tem o objetivo de aplicar o modelo SHALSTAB para analisar o mapeamento de zonas suscetíveis a deslizamentos rasos da Sub-bacia do Rio Comprido, no município de Joinville/SC, em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), associando dados de relevo, geologia, pedologia e hidrologia da região para a criação de mapas de suscetibilidade em escala 1:1.000. A pesquisa tem o intuito de contribuir para que a expansão urbana não ocorra sobre novas áreas susceptíveis ao risco de deslizamentos no município de Joinville/SC.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos últimos anos, o crescimento das cidades tem sido estudado no que diz respeito aos aspectos ambientais. Estes estudos são realizados para identificar os efeitos negativos e desenvolver ações de monitoramento; que têm o objetivo de facilitar o planejamento urbano. Os sistemas de informação geográfica (SIGs) são de grande auxílio para esse planejamento por se tratarem um tipo de ferramenta de computação utilizada no Geoprocessamento de maneira a realizar análises complexas pelo processamento integrado de banco de dados, além de ser capaz de criá-los com grande grau de confiabilidade.

Com a disseminação do uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), os estudos de perigo ou de previsão de áreas instáveis tiveram um grande desenvolvimento a partir da década de 1990 (TOMINAGA *et al.*, 2009), especialmente por se tratar da Década Internacional de Redução dos Desastres (1990-1999). Além disso, os métodos, técnicas de identificação, análise e cartografia dos riscos naturais no Brasil têm extenso desenvolvimento e tratam de deslizamentos majoritariamente.

De acordo com Selby (1993), o rompimento seguido de deslocamento de solos e rochas sob a ação da gravidade é nomeado movimento gravitacional de massa. Essas perdas de massa ocorrem em todos os ambientes e épocas, porém sua dinâmica é complexa e naturalmente está associada ao aumento das tensões cisalhantes do solo, à diminuição da resistência ao cisalhamento causada por descontinuidades na sua estrutura e aos processos de intemperismo que afetam a resistência do material (THIVES E TRICHÊS, 2009).

No Brasil, os movimentos de massa mais comuns são os deslizamentos, entendidos como sendo um deslocamento rápido de uma massa de volume bem definido de material presente na encosta, cujo centro de gravidade avança na direção para frente e para baixo (TERZAGHI, 1960). Os deslizamentos translacionais, objeto deste estudo, apresentam morfologia rasa, com profundidade de 0,5 a 5 metros (TOMINAGA *et al.*, 2009).

A suscetibilidade a deslizamentos de uma área está diretamente relacionada à probabilidade dessa área ser atingida por fatores desencadeantes. Segundo autores como Tucci (1993), variáveis como hipsometria e declividade são condicionais e interferentes no processo de geração do escoamento superficial. Assim sendo, a translação e o armazenamento ficam dependentes da disposição no espaço das vertentes e da rede de drenagem.

Guimarães *et al.* (2004) mencionou que o modelo SHALSTAB tem bom desempenho em áreas tropicais, além das áreas de clima temperado para as quais foi desenvolvido, mas o desempenho do modelo foi sensível a resolução de DEM e escala do mapa topográfico: um DEM de alta resolução e escala 1:10.000 dos dados topográficos aumentam o desempenho do modelo para a previsão de deslizamentos rasos.

O *Shallow landslide stability model* – SHALSTAB – (MONTGOMERY E DIETRICH, 1994) é um modelo de base física, que prevê a instabilidade a deslizamentos rasos com base na precipitação crítica, incluindo o modelo de estabilidade de encosta infinita utilizando os critérios de falha de Mohr-Coulomb e o modelo hidrológico de estado uniforme que considera fluxos subsuperficiais constantes (O'LOUGHLIN, 1986), conforme a Figura 1.

a) b)

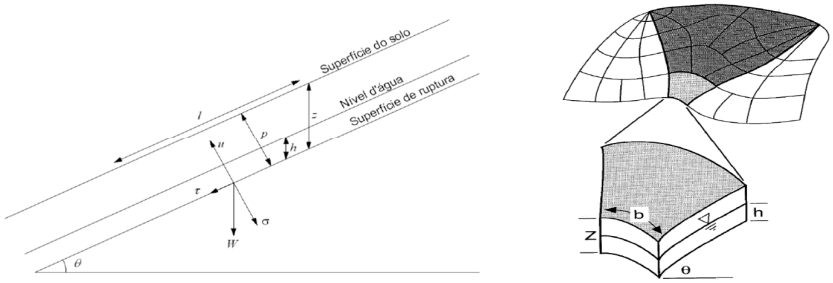


Figura 1. Modelo SHALSTAB: a) Representação do Modelo de Encosta Infinita (MICHEL, 2013). b) Os parâmetros utilizados por O'loughlin (1986) para calcular umidade relativa.

A teoria do talude infinito expressa a estabilidade de uma encosta baseada nas tensões responsáveis pela sua sustentação (σ) e naquelas responsáveis pela sua desestabilização (τ), conforme Figura 1a. Sendo assim, a teoria coloca a resistência ao cisalhamento como o principal parâmetro analisado que determina a segurança do talude, tendo como base o critério de ruptura de Mohr-Columb.

$$\tau = c + (\sigma - \mu)\tan\phi \qquad (1)$$

Onde: τ é a resistência ao cisalhamento; c é a coesão efetiva; σ é a tensão normal ao plano de ruptura; μ é a poropressão; ϕ é o ângulo de atrito interno.

Para a análise de deslizamentos rasos, utilizando o modelo de estabilidade de encosta infinita, os efeitos causados por atrito nas laterais e nas extremidades são desprezados. Assim, a Equação (1) pode ser reescrita e resolvida em função de $\frac{h}{z}$, que é a proporção da coluna de solo que está saturada quando ocorre a instabilidade:

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \qquad (2)$$

Onde: h é a espessura do solo saturado acima da camada impermeável, z é a espessura total do solo, ρ_s é a massa específica do solo úmido, ρ_w é a massa específica da água, θ é a declividade da encosta e g é a aceleração gravitacional.

O Modelo Hidrológico de Estado Uniforme é descrito por O'Loughlin (1986) e calcula também a umidade relativa baseada no fluxo de água em estado uniforme paralelo ao plano inclinado (Figura 1b).

$$W = \frac{q}{T}\frac{a}{b\sin\theta} \qquad (3)$$

Onde: W é a umidade relativa ou saturação relativa do solo, a é a área de contribuição, e b é o comprimento do contorno topográfico, q é a taxa de recarga da precipitação e T é transmissibilidade do solo.

O SHALSTAB também utiliza o parâmetro $\frac{h}{z}$ como resultado da Equação (3):

$$W = \frac{h}{z} = \frac{q}{T}\frac{a}{b\sin\theta} \qquad (4)$$

Se o SHALSTAB é uma equação unidimensional de estabilidade de taludes infinitos sob o critério de Mohr-Coloumb em termos da razão do modelo hidrológico $\frac{q}{T}$ (o estado uniforme crítico para desencadear a falha) para a estabilidade relativa da encosta classificada, então:

$$\frac{q}{T} = \frac{\sin\theta}{a/b}\left[\frac{\rho_s}{\rho_w}\left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{c}{g \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot \rho_w}\right] \qquad (5)$$

Para os resultados, porque $\frac{q}{T}$ é sempre <1, log $\frac{q}{T}$ é utilizada (MONTGOMERY E DIETRICH, 1994). Um valor de log $\frac{q}{T}$ é calculado para cada pixel no Modelo Digital do Terreno da área de estudo. Os mapas obtidos por este procedimento podem classificar a susceptibilidade da ocorrência de escorregamentos rasos como: a) incondicionalmente instáveis (Equação (6)); b) incondicionalmente estáveis (Equação (7)); e c) potencialmente instáveis que dependem da quantidade de água.

$$\tan\theta \geq \tan\phi + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \qquad (6)$$

$$\tan\theta \leq \tan\phi\left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \qquad (7)$$

3 MÉTODOS E MATERIAIS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

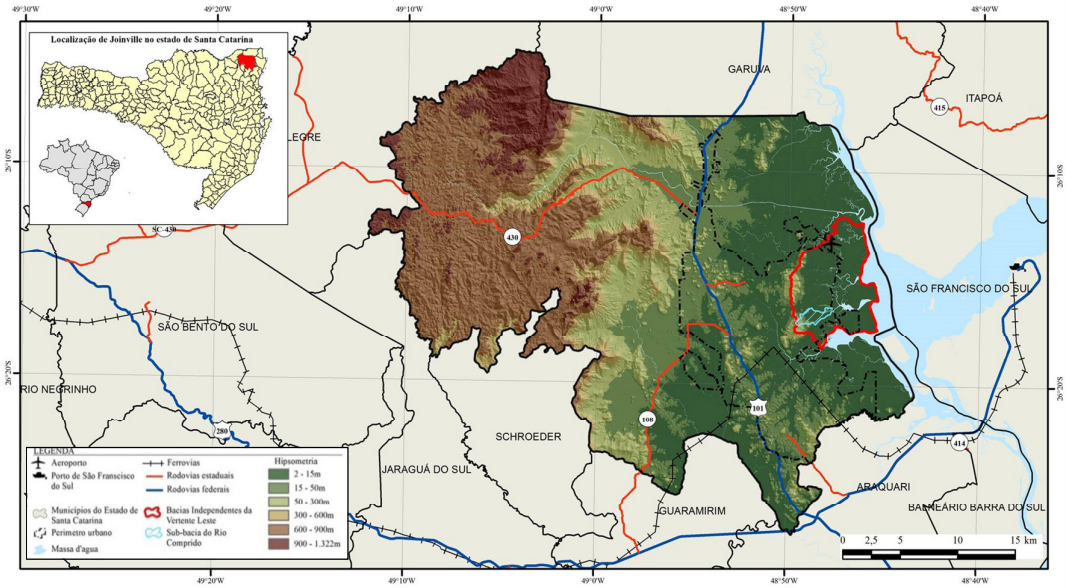


Figura 2. Localização da Sub-bacia do Rio Comprido no município de Joinville/SC.

Na região nordeste do Estado de Santa Catarina situa-se o município de Joinville, aproximadamente entre as coordenadas 26°15' S e 48°45' W, compreendendo uma área total de 1.135,05 Km^2, dos quais 212,6 km^2 são de área urbana e 922,45 km^2 de área rural (MAIA

et al., 2013). Sua população, segundo o censo de 2010 do IBGE, é de 515.288 habitantes (IBGE, 2010), sendo a maior cidade do Estado em população.

O Rio Comprido possui nascente no Morro do Boa Vista e desagua diretamente na Baía de Babitonga. Com área de 2,5 km² e com um perímetro de cerca de 8 km, a Sub-bacia do Rio Comprido possui relevo mais elevado na porção sudeste com morros altos, chegando a 178 m, e planícies e terraços fluviais e marinhos entre 0 – 10 m (Figura 2).

A Sub-bacia do Rio Comprido é uma bacia urbanizada e engloba parte da recente Unidade de Conservação Área de Relevante Interesse Ecológico do Morro do Boa Vista. O solo é predominantemente cambissolo, tendo áreas menores de argissolo, neossolo e indiscrimandos de mangue. Além disso, a cobertura vegetal é caracterizada por floresta ombrófila densa.

O clima é subtropical constantemente úmido, sem estação seca, com verão quente, faz da região na qual a Sub-bacia do Rio Comprido está localizada, aquela com as médias anuais de temperatura, precipitação e umidade mais elevadas do Estado de Santa Catarina (MAIA *et al.*, 2013).

3.2 DADOS EXISTENTES E MAPAS DERIVADOS

O levantamento do material para a elaboração dos mapas derivados referente à área de estudo foi realizado basicamente junto ao Sistema de Informações Municipais Georreferenciadas da Prefeitura Municipal de Joinville (SIMGeo) e ao Eng. Gabriel Rosolem.

Segundo Guimarães *et al.* (2009), o MDT constitui a base para a determinação da declividade (θ) e da área de contribuição (a), sendo componente fundamental no modelo de predição de zonas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos rasos. Neste trabalho, o mapa foi elaborado com o uso do software de geoprocessamento ArcMap 10.1®, da ESRI, no qual gerou-se um MDT em malha retangular através da ferramenta *Topo to Raster*, a partir das curvas de nível com intervalos de 1 m, em escala 1:1000 da restituição aerofotogramétrica de 2007 do SIMGeo.

O MDT gerado apresenta imperfeições, fazendo-se necessária a regularização através da criação do mapa de sumidouro. A correção do MDT elimina picos e sumidouros que podem afetar a análise de distribuição do fluxo d'água através da ferramenta *pit remove* da extensão TauDEM®, disponibilizada gratuitamente pela Utah State University para utilização no software ArcMap 10.1®.

Para entender melhor a ocorrência dos deslizamentos de terra, em relação à declividade, foi obtido o mapa de declividade para a área de estudo através do software ArcMap 10.1®, tendo como base o MDT corrigido gerado anteriormente. A ferramenta *slope* consiste em uma ferramenta que reconhece o valor de elevação de cada *pixel* e gera mapas de declividade em porcentagem ou em graus.

O mapa de área de contribuição se correlaciona com a rede de drenagem da região de estudo ao capturar o efeito da topografia no fluxo de água da bacia criando uma superfície de acúmulo de fluxo a partir das direções de fluxo. A área de contribuição (a) calculada para cada célula do grid, corresponde ao valor da área correspondente à bacia a montante de cada pixel específico (a/b) (Moore *et al.* 1991), parâmetro da equação combinada dos modelos de Estabilidade e Encosta Infinita e Hidrológico de Estado Uniforme.

Neste trabalho, a geração do mapa da área de contribuição considerou infinitas direções pelo método D-Infinito, de Tarboton (1997), que realiza a distribuição de fluxo de forma proporcional entre as células localizadas à jusante, de acordo com a declividade local. Para tanto, utilizou-se no software ArcMap 10.1® a extensão TauDEM®, que calcula a área de contribuição pelo método D-Infinito. Com a mesma extensão também obteve-se o mapa de direções de fluxo, que indica a direção do escoamento da água.

O mapa pedológico foi obtido pelo SIMGeo, na escala 1:10.000, em SIRGAS 2000 e no formato *shape*. A informação acerca das características geotécnicas do solos da Sub-bacia do Rio Comprido utiliza dados cedidos pelo Eng. Gabriel Rosolem como resultados de ensaios laboratoriais realizados com 3 amostras de solos coletadas entre as unidades geotécnicas da Sub-bacia do Rio Comprido e da Sub-bacia da Lagoa do Saguaçú.

A partir desses dados foram gerados os mapas dos parâmetros físicos dos solos utilizados para o cálculo da suscetibilidade a deslizamentos foram gerados automaticamente através do software ArcGis 10.1 ®, após sua inclusão na tabela de atributos do Mapa Pedológico com posterior extração através da ferramenta *feature to raster*.

3.3 MODELO SHALSTAB

O uso do MDT acoplado à combinação de um modelo de estabilidade de encostas com um modelo hidrológico são a base da metodologia de predição de escorregamentos rasos utilizada pelo SHALSTAB, que utiliza as variáveis topográficas a, b, θ e z, as variáveis pedológicas ρ_s, ϕ, c e T, além da hidrológica q.

Inicialmente este modelo foi desenvolvido para rodar em ambiente ArcInfo, segundo a linguagem AML (*Arcinfo Macro Language*). Em seguida, foi possível aplicar a rotina em ambiente ArcView. Recentemente, com o surgimento do software ArcMap, Michel (2013) desenvolveu uma rotina do programa para rodar neste ambiente, sendo então escrito como álgebra de mapas e incluindo duas variáveis relativas à influência da vegetação (S_w e c_r). A Equação(8) apresenta as modificações realizadas na Equação (5), em função de $\frac{q}{T}$.

$$\frac{q}{T} = \frac{\sin\theta}{a/b}\left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} + \frac{S_w}{g \cdot z \cdot \cos\theta \cdot \rho_w}\right)\left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{c_r + c_s}{g \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot \rho_w}\right] \qquad (8)$$

A rotina proposta por Michel (2013) possibilitou a espacialização dos parâmetros pedológicos e hidrológicos de acordo com os tipos de solo da Sub-bacia do Rio Comprido. O algoritmo original considera variáveis relativas à vegetação que são ignoradas neste estudo. Já o método D-Infinito (Tarboton, 1997) possibilitou a análise do fluxo de água subsuperficial em infinitas direções, solucionando a limitação hidrológica unidirecional e constante. Ambas as soluções são utilizadas em ambiente ArcMap®, a primeira através da álgebra de mapas e a segunda através da extensão TauDEM®.

Como neste estudo não foram considerados os efeitos da vegetação, os dados de entrada estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de entrada do modelo SHALSTAB.

Parâmetro	PAd1	CXd1	CXd4	RLd4	Unidade
ϕ	28,4	28,1	28,1	27,4	graus
c	1.380	2.230	2.230	100	Pa
ρ_s	1.819	1.806	1.806	1.487	kg/m³
θ	varia a cada pixel do grid calculado através do MDT				graus
b	varia a cada pixel do grid calculado através do MDT				m
a	varia a cada pixel do grid calculado através do MDT				m²
g	9,81				m/s²
ρ_w	1.000				kg/m³
z	2 e 5				m

4 RESULTADOS

A metodologia aplicada permitiu a obtenção dos parâmetros de declividade e área de contribuição (Figura 3) a partir do MDT elaborado e corrigido. Como resultado, o MDT

em malha retangular disponibilizado tem 1 m de resolução horizontal, numa amplitude altimétrica de 0,53 m a 178 m e fornece uma boa interpretação do relevo.

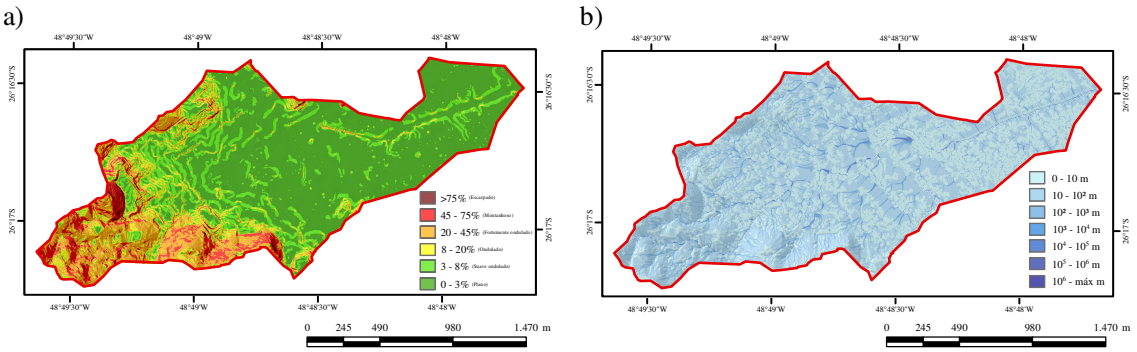


Figura 3. a) Declividades e b) Área de Contribuição da Sub-bacia do Rio Comprido.

As vertentes da Sub-bacia do Rio Comprido são majoritariamente planas (52,87 %). A declividade expressa graficamente a característica de movimentação do relevo indo de 0 a 52,4 ° e crescendo no sentido litoral-Morro do Boa Vista. Como já esperado os maiores valores encontram-se na região de morros e os menores nos limites próximos ao litoral. As vertentes com mais de 45% representam cerca de 6,41 % da área da bacia.

Como a declividade é um dos parâmetros mais importantes para deflagração dos deslizamentos rasos, para a Sub-bacia do Rio Comprido, a incidência deste tipo de fenômeno pode ser atribuída em grande parte à condição de seu relevo nas regiões mais altas.

A área de contribuição deve levar em consideração a topografia no fluxo d'água e ter uma forte correlação com a rede de drenagem da bacia. Neste estudo, a área de contribuição apresenta o comportamento esperado delineando principalmente as áreas das bacias de drenagem para os limites analisados, com exceção da parte retificada do Rio Comprido. As maiores taxas de contribuição ficam a oeste da Sub-bacia devido à presença do divisor de águas representado pelo Morro do Boa Vista. Vale ressaltar que devido à urbanização, a drenagem na área mais plana pode ser diferente do modelado, mas isso não implica na análise da estabilidade da encosta.

O mapa pedológico adquirido pelo SIMGeo leva em conta tanto a procedência pedológica quanto a litológica do solos da área de estudo. Por conta desse detalhamento e do fato dos mapas geológicos da área serem de pequena escala, menores que 1:100.000, utilizou-se o mapa pedológico e a referência atribuída por ele ao material de origem de cada unidade como de estimativa das unidades geotécnicas, que, por sua vez, subsidiaram a coleta de amostras para os ensaios de caracterização dos solos (Figura 4).

As unidades geotécnicas identificadas foram: PAd1 - Argissolo amarelo de substrato gnaisse (15,66 % da Sub-bacia); CXd1 - Cambissolo háplico de substrato gnaisse (10,05 %); CXd4 - Cambissolo háplico de substrato de sedimentos do período Quaternário (56,78 %); RLd4 - Neossolo litólico de substrato gnaisse (7,58 %); e Mg - Solos indiscriminados de mangue (9,94 %). Esta última possui relevo plano em 81,32 % densamente ocupado e aterrado. Tais fatores atrelados à dificuldade na obtenção de dados pedológicos e geotécnicos, levaram à desconsideração da unidade geotécnica Mg da modelagem do SHALSTAB.

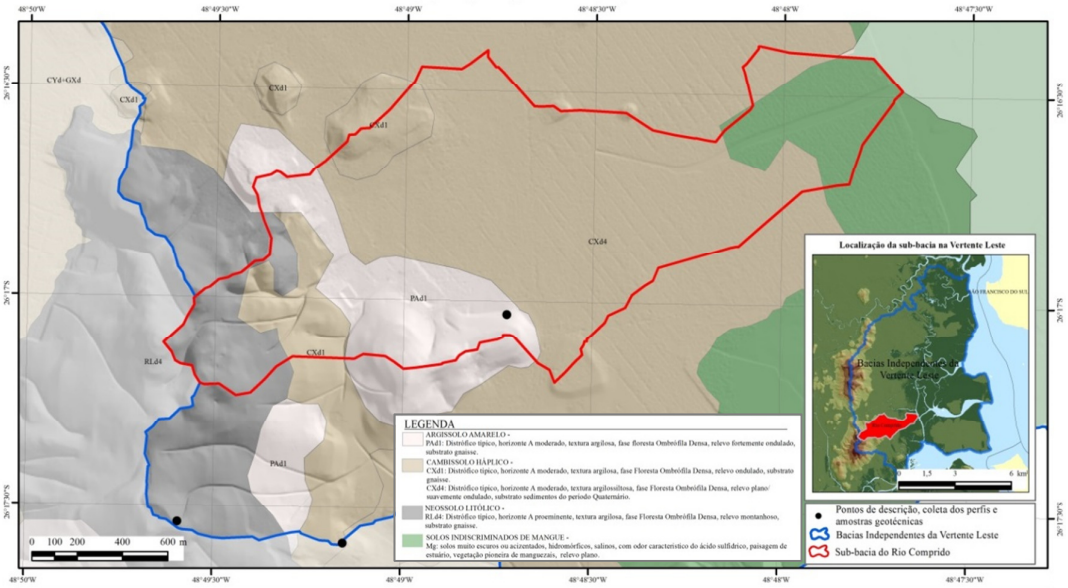
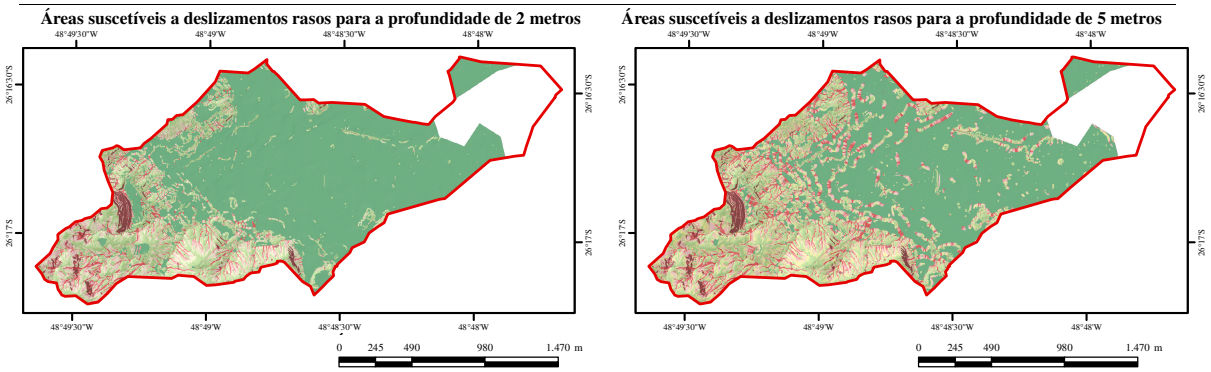


Figura 4. Estimativas das Unidades Geotécnicas da Sub-bacia do Rio Comprido.

A partir dos mapas de parâmetros topográficos, pedológicos e de propriedades geoténicas dos solos, o Modelo SHALSTAB gerou os mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos da Sub-bacia do Rio Comprido, sob diferentes cenários de profundidade de ruptura: 2 e 5 metros, com as 7 classes de estabilidade estabelecidas por Montgomery e Dietrich (1994). Nos dois cenários utilizaram-se as massas específicas saturadas dos solos, a fim de gerar as condições com maior contribuição do peso do solo, que são as mais desfavoráveis.

Tabela 2. Classes de estabilidade para as profundidades de ruptura de 2 e 5 metros.



	Área (%)							
	PAd1		CXd1		CXd4		RLd4	
Classe de estabilidade	**2 m**	**5 m**	**2 m**	**5 m**	**2 m**	**5 m**	**2 m**	**5 m**
Incondicionalmente instável e não saturado	2,02	2,69	0,84	1,51	0,06	0,08	13,33	13,56
Incondicionalmente instável e saturado	7,26	11,76	4,84	6,37	0,30	3,61	11,67	11,92
Instável e saturado	5,41	7,91	3,59	10,27	0,26	3,00	9,53	9,63
Instável e não saturado	9,68	13,44	7,32	12,08	0,50	4,68	17,04	17,14
Estável e não saturado	15,92	18,62	13,64	18,39	1,02	4,93	20,58	20,39
Incondicionalmente estável e não saturado	40,31	37,93	42,30	41,54	4,81	7,99	27,83	27,35
Incondicionalmente estável e saturado	19,40	7,63	27,48	9,84	93,05	75,71	0,02	0,01

A distribuição das classes de estabilidade das vertentes na Sub-bacia do Rio Comprido revela que as encostas suscetíveis a deslizamentos encontram-se, de certa forma,

distribuídas por toda a bacia nos diferentes cenários. Nota-se a forte influência do tamanho da área de contribuição na classificação realizada pelo modelo, pois padrões de classificação com menores níveis de estabilidade quase sempre são gerados nas áreas com concentração de linhas de fluxo.

A simulação gerou os mapas de estabilidade hierarquizados nas 7 classes estabelecidas por Montgomery e Dietrich (1994), que se distribuem na Sub-bacia conforme apresentado na Tabela 2, na qual é possível quantificar a porcentagem de cada nível de estabilidade em relação ao total em área da Sub-bacia nos cenários simulados.

A declividade favorece instabilidade das vertentes, de modo que, quando alta, tende a ter maior incidência de processos erosivos. Além disso, Dietrich e Montgomery (1998) afirmam que encostas íngremes são mais propensas a ocorrências deslizamentos, porque devido às declividades acentuadas menos chuva é necessária para causar sua instabilidade.

O modelo estabelece, majoritariamente, a condição estável para todas as áreas planas nos dois cenários, situação em que a razão $\frac{h}{z}$ é igualada a 1 e o ângulo de declividade da encosta é menor que a relação entre as outras variáveis. As áreas com maior declividade têm grande relação com a instabilidade, pois na classe incondicionalmente instável a razão $\frac{h}{z}$ na equação do modelo é igualada a zero e o ângulo de declividade da encosta permanece maior que a relação entre as outras variáveis. Na Sub-bacia do Rio Comprido a área de classificada como Incondicionalmente instável pelo modelo ocupa 4,14 % e 7,48 % da área total da Sub-bacia, respectivamente para os dois cenários de profundidade de ruptura e está correlacionada às regiões de relevo fortemente ondulado a escarpado do Morro do Boa Vista, concentradas na região oeste da área de estudo e que correspondem a 19,71 % da área Sub-bacia.

Além disso, constata-se que as regiões estáveis correspondem a 80,00 % e 70,98 % da área da Sub-bacia do Rio Comprido para as profundidades de ruptura de 2 e 5 metros, respectivamente. Ainda para os mesmos cenários, 5,88 % e 11,57 % da área da bacia apresentam encostas com índice nas classes Instável e saturado e Instável e não saturado, principalmente nas áreas com elevada declividade.

Deste modo, ao aumentar a profundidade de ruptura é bastante perceptível o aumento das condições mais instáveis, ainda acompanhando as declividades do terreno. Os maiores incrementos são observados nas classes Instável e não saturado (3,44 %) e Incondicionalmente instável e saturado (3,13 %), enquanto o maior decréscimo é referente à classe Incondicionalmente estável e saturado (-13,46 %). Tais contribuições aumentam a instabilidade da Sub-bacia no sentido Morro do Boa Vista-litoral, ocupando as áreas planas, ocupando as zonas estáveis resultantes da simulação para a profundidade de 2 metros.

Os cenários criados demonstram uma grande possibilidade de futuros deslizamentos, principalmente nas áreas mais altas. Entretanto, são observadas diversas zonas de instabilidade nas áreas planas com o aumento da profundidade de ruptura, o que pode ser atribuído ao fato de que a contribuição do peso do solo aumenta a energia potencial dos movimentos de massa nessas áreas. Além disso, cabe comentar que as análises deste estudo preveem zonas de suscetibilidade ao início dos deslizamentos, o que implica que regiões mapeadas como incondicionalmente estáveis e saturadas não estão necessariamente fora de perigo, pois podem ser atingidas por massas mobilizadas de zonas adjacentes com maior instabilidade.

Ressalta-se que já no cenário com profundidade de 2 metros é visível a delimitação do Morro do Boa Vista e do retaludamento nas porções oeste e noroeste da Sub-bacia, respectivamente. Observa-se que o retaludamento é classificado como instável nos dois cenários, devido ao ângulo do talude. Além disso, é possível identificar que o retaludamento

na região noroeste da Sub-bacia encontra-se na unidade geotécnica RLd4, que possui forte risco de erosão por conter um solo raso, pedregoso e presente nas altas declividades da Sub-bacia. Mesmo com a contenção instalada, a área é incondicionalmente instável e não saturada, além de ser próximas a assentamentos humanos. Possivelmente, a ação antrópica tem ligação direta com os possíveis deslizamentos que ocorreram na área antes de sua construção, que não foi suficiente para garantir a estabilidade do solo na região.

Analisando através da sobreposição das unidades geotécnicas sobre as áreas suscetíveis a deslizamentos rasos, nota-se que as encostas mais instáveis encontram-se nas unidades PAd1 e RLd4 em todos os cenários. Para o RLd4, além da declividade elevada, a coesão estimada nos ensaios foi baixa, tornando a região bastante instável. Tal comportamento pode ser associado ao pouco desenvolvimento do solo.

Em relação à sensibilidade do modelo à variação da profundidade, é notável que a estabilidade das encostas foi mais afetada em solos profundos (PAd1, CXd1 e CXd4) que em rasos (RLd4). Isso ocorre porque para definir uma região com alta instabilidade, o modelo avalia a permanência de uma camada de solo espessa sobre uma superfície de grande declividade. Porém, devido ao caráter raso do RLd4, combinado às altas declividades, essa condição não é satisfeita, de modo os níveis de estabilidade são praticamente equivalentes.

A unidade predominante na bacia, CXd4, apresentou regiões estáveis nos dois cenários, majoritariamente, com apenas 1,12 % de instabilidade para a profundidade de 2 metros. Tal comportamento está associado à alta coesão encontrada nos ensaios, combinada ao relevo plano.

Geralmente, a melhor adaptação de um modelo a uma área se dá quando o inventário de deslizamentos coincide com as áreas classificadas como instáveis e ao mesmo tempo estas áreas representam uma pequena porcentagem da área de estudo. Sendo assim, cabe ressaltar que é necessário calibrar o modelo com base em cicatrizes de deslizamentos antigos para validar a eficiência de cada cenário. A dificuldade quanto ao inventário é que normalmente está incompleto, não preciso em relação a onde ocorreu o deslizamento e com pouca confiabilidade para classificar o tipo do deslizamento e a profundidade.

5 CONCLUSÃO

O modelo SHALSTAB mostrou-se uma ferramenta pertinente na identificação do grau de estabilidade das vertentes, porque é constituído de um modelo de fácil aplicação, que associa parâmetros topográficos com hidrológicos, por meio da área de contribuição específica e da declividade. Além de já ter sido amplamente testado e avaliado o seu desempenho em áreas de clima e relevo similares.

A confiabilidade dos resultados a serem obtidos com o modelo SHALSTAB está diretamente relacionada à produção de um MDT e de um mapa da área de contribuição detalhados e precisos. A utilização das curvas de nível e pontos cotados em escala 1:1.000 permitiu a geração do MDT com 1 metro de resolução horizontal de alta qualidade. Além disso, o método D-Infinito possibilitou a delimitação da área de contribuição, definindo claramente a rede de drenagem das áreas simuladas.

Por sua vez, o algoritmo modificado por Michel (2013) e o uso de dados provenientes de fontes confiáveis facilitaram a aplicação das rotinas utilizadas. Além disso, a espacialização dos parâmetros geométricos dos solos permite que suas características sejam integradas à análise dos processos de deflagração dos deslizamentos, contribuindo significativamente na acurácia do modelo.

Foram identificadas e caracterizadas as unidades geotécnicas da área de estudo. O ajuste do mapa geotécnico resultou na desconsideração dos Solos indiscriminados de mangue

durante a modelagem. Apesar disso, a análise da estabilidade das encostas não ficou comprometida, visto que a unidade localiza-se na planície litorânea da sub-bacia.

Como resultado, a modelagem aponta uma relação forte entre as áreas mapeadas com algum grau de instabilidade e as áreas de maior declividade. Esta tendência era esperada para o tipo de processo mapeado, considerando o fato de que, a declividade é apontada como um dos principais gatilhos para o desencadeamento de deslizamentos rasos.

As áreas com instabilidade incondicional e que são extremamente susceptíveis à ocorrência de movimento de massa na Sub-bacia do Rio Comprido compreendem menos de 10% de sua área total. Destaca-se a importância da preservação dessas áreas com relação às atividades humanas, pois são naturalmente instáveis, especialmente àquelas com Neossolo litólico de substrato gnaisse (RLd4).

Nas demais áreas, com exceção das estáveis, as atividades humanas devem ser realizadas com cautela e considerando a possibilidade de ocorrência de deslizamentos rasos, como no caso de equipamentos urbanos que concentram grande quantidade de pessoas, principalmente as mais vulneráveis.

Ressaltando o potencial para contribuição do uso de modelos determinísticos na gestão de riscos a desastres, a identificação das áreas de suscetibilidade a deslizamentos rasos subsidia ações preventivas e a tomada de decisões. A metodologia empregada possibilita a realização deste tipo de mapeamento em curto prazo e custos reduzidos, abrindo a possibilidade de reprodução em áreas similares, inclusive nas áreas mais carentes de estudos especializados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORDERO *et al*. Estudo da precipitação máxima diária para Blumenau-SC e o evento de novembro de 2008. Anais **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande, Brasil, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Informações sobre os municípios brasileiros.** 2010. Disponível em: <http://ibge.gov.br>. Acesso em: abril 2015.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.;MOLLERI, G.S.F.; RUDORFF, F.M. 2006. **Prevenção de Desastres**: Conceitos Básicos. Curitiba: Ed. Organic Trading. 109 p.

MAIA, B. G. O.; KLOSTERMANN, D.; RIBEIRO, J. M. G.; SIMM, M.; OLIVEIRA, I. M. N.; BARROS, V. G. **Bacias Hidrográficas de Joinville.** Joinville: 2013.

MICHEL, G. P. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação** – Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 152p, 2013.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W.E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, 30 (4): 1153-1171. 1994.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. (1991) Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrological Processes**, 5 (1): 3-30.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, 22 (5): 794-804, 1986.

SELBY, M. Hillslope Materials and Processes. Oxford University Press, Oxford, 289p. 1993.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, 33 (2): 309-319, 1997.

TERZAGHI, K. Mechanism of Landslides. In: **From Theory to Pratice in Soil Mechanics.** John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A., 1960. p.83-123.

THIVES, L. P.; TRICHÊS, G. **A sustentabilidade na mobilidade.** 2009, p. 62-91. Notas de Aula. Impresso.

TOMINAGA, L. K., SANTORO, J., AMARAL, R. **Desastres: conhecer para prevenir.** Instituto Geológico, São Paulo, 2009.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia ciência e aplicação.** ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. 943p.

TUNDISI, J. G. **Água no Século XXI: Enfrentando a escassez.** IIE. São Carlos: RiMa, 2003. 248p.